

УДК 656.7.052.001.57 (045)

С.А. Загора

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ В УМОВАХ ВІЛЬНОГО ПОЛЬОТУ

Інститут інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: [sevastian@ukr.net](mailto:sevastian@ukr.net)

*Розглянуто сучасні підходи до розв'язання конфліктних ситуацій у повітряному просторі вільного польоту Free Flight Airspace. Наведена розширена класифікація методів розв'язання конфліктів.*

### Основні положення

У сучасних системах організації повітряного руху (АТМ), які базуються на принципі централізованого контролю за повітряним простором у районних диспетчерських пунктах, відповідальність за забезпечення мінімумів ешелонування майже повністю покладена на наземних диспетчерів. Можливості диспетчера щодо розв'язання потенційно-конфліктних ситуацій суттєво обмежені, що є стримуючим фактором у розвитку всієї системи АТМ, особливо при постійному зростанні інтенсивності повітряного руху.

Серед можливих рішень цієї проблеми розглядається впровадження глобальної концепції вільного польоту (Free Flight), основні положення якої полягають у наданні повітряним суднам (ПС) можливості виконувати польоти за гнучкими маршрутами (flexible routes) та перенесення частини відповідальності за забезпечення необхідного ешелонування ПС на борт літака. При цьому під гнучкими маршрутами мають на увазі польоти за оптимальними траєкторіями при гарантованому рівні безпеки польоту.

Найголовніші дослідження в рамках Free Flight пов'язані з проблемою забезпечення мінімумів ешелонування ПС. Запропоновано різні підходи до розподілення відповідальності за розв'язання конфліктних ситуацій між бортовою та наземною частинами. При цьому значна увага приділяється вивченню впливу людського фактора на функціонування системи, розробці людино-машинних інтерфейсів (НМІ – Human Machine Interface) для наземних та бортових систем прогнозування та попередження конфліктних ситуацій.

### Класифікація методів розв'язання конфліктних ситуацій

Спроби провести класифікацію методів та алгоритмів розв'язання конфліктних ситуацій між ПС можна знайти в праці [1], де розглядаються такі класифікаційні ознаки:

– розмірність простору, в якому виявляють конфлікт, і геометрія конфлікту;

– спосіб прогнозування положення ПС;  
– спосіб аналізу ступеня небезпеки ситуації;  
– спосіб розрахунку безпечного маневру;  
– типи можливих маневрів та їх керовані параметри;

– стратегія розв'язання конфліктів.

Однак вказана класифікація не є повною і може бути розширена такими ознаками (рис. 1):

– спосіб розподілу відповідальності за розв'язання конфлікту;  
– типи маршрутів повітряного руху, до яких може застосовуватися метод;  
– тип часового діапазону визначення конфліктів (відносно залишку часу до небезпечного наближення);

– типи перешкод, що враховуються.

За розмірністю простору, в якому виявляють конфлікт, і геометрією конфлікту виділяють методи визначення конфліктів:

– у горизонтальній площині [2];  
– у вертикальній площині (системи GPWS);  
– у горизонтальній і вертикальній площинах [3–6].

Найчастіше використовують часовий та критерій виявлення конфлікту, тобто залишок часу до точки прогнозованого найнебезпечнішого наближення (CPA).

За способом прогнозування положення ПС виділяють такі методи:

– геометричні;  
– найгіршого випадку;  
– імовірнісні.

Геометричні методи полягають у розрахунку майбутнього положення ПС шляхом екстраполяції траєкторії руху ПС [2; 3].

Визначення конфлікту при цьому зводиться до оцінки відстані між прогнозованими положеннями ПС.

Методи найгіршого випадку припускають врахування області всіх можливих траєкторій ПС, починаючи з поточного положення [4]. Область можливих траєкторій формує так званий коридор маневрів. Перетинання коридорів двох ПС дає область можливого конфлікту.

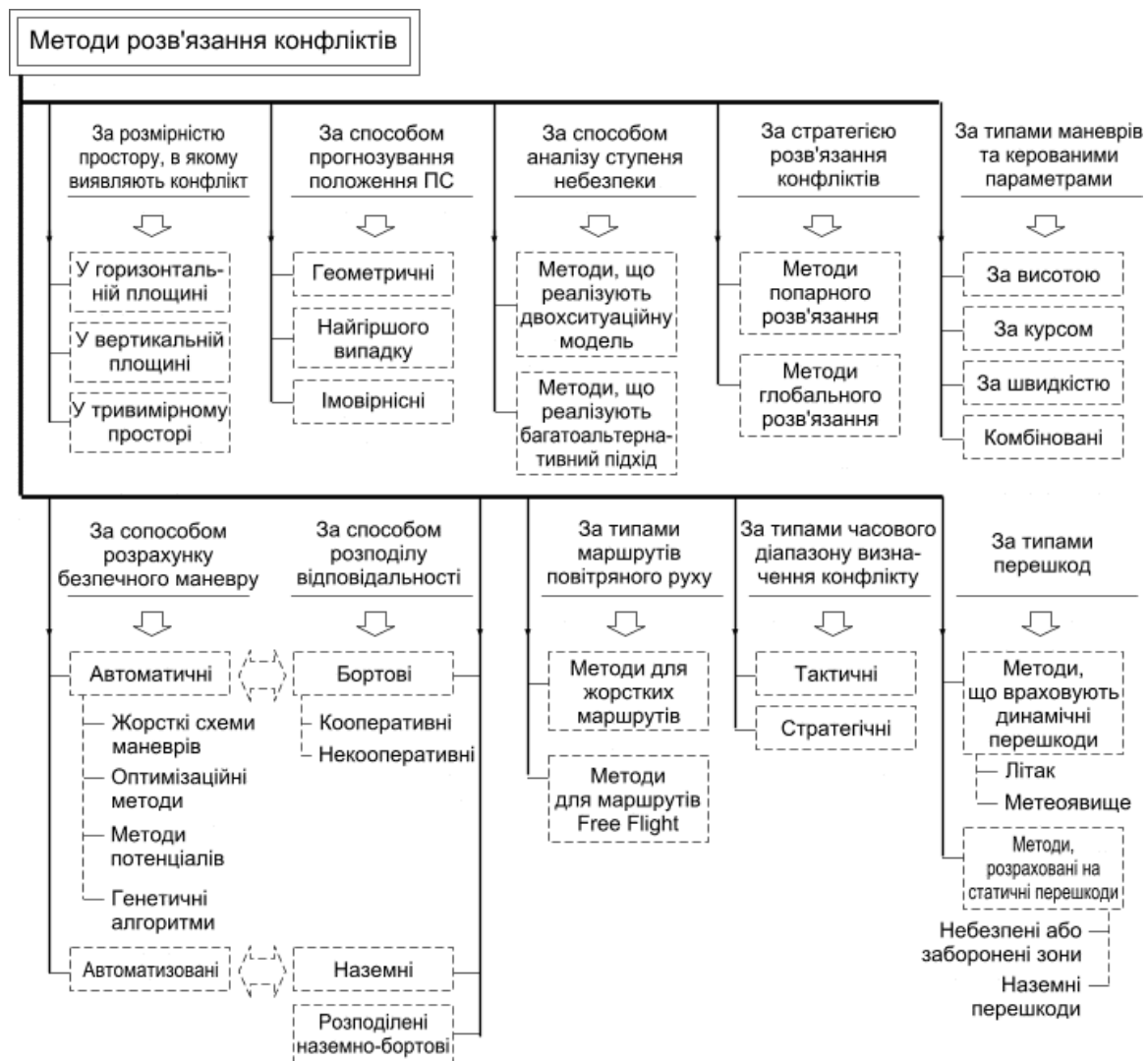


Рис. 1. Класифікація методів розв'язання конфліктних ситуацій

Імовірнісні методи є узагальненням геометричного методу і методів найгіршого випадку, оскільки відповідно до одного із способів його реалізації вважається, що ПС може слідувати за кожною з можливих траєкторій, починаючи з поточного моменту з певною ймовірністю відповідно до прийнятого закону розподілу щільності ймовірності [5–7]. При цьому найбільш імовірною траєкторією ПС є лінія руху, що отримана геометричним методом, а найменш імовірними траєкторіями є межі коридору маневрів, розраховані за допомогою методу найгіршого випадку.

Імовірнісні методи можуть враховувати невизначеність поточного положення, а також швидкісних і кутових параметрів руху ПС. У цьому випадку прогнозоване положення ПС визначається еліпсом розсіювання з максимальною ймовірністю знаходження ПС у центрі цього еліпса, а ймовірність виникнення конфлікту двох

ПС обчислюється як добуток ймовірностей на ділянці перетину еліпсів двох ПС.

Геометричні методи і методи найгіршого випадку мають значні недоліки порівняно з імовірнісними методами. Геометричні методи не враховують невизначеність поточного та прогнозованого векторів стану ПС (положення та швидкість).

Використання методів найгіршого випадку є найбільш безпечним через ризик зіткнення, однак ці методи мають великий рівень хибних тривог і призводять до неефективного використання повітряного простору. Тому геометричні методи і методи найгіршого випадку можна застосовувати тільки для прогнозування положення ПС на порівняно невеликі проміжки часу, коли не очікується істотних змін у швидкісних і кутових параметрах руху.

Більше відповідають умовам Free Flight імовірнісні методи.

Під час аналізу ступеня небезпеки ситуації в методах, що використовують двоситуаційну модель проводиться порівняння метрики ситуації з певним пороговим параметром (порогом), після чого ситуація визначається як конфліктна або нормальна [2; 3].

З порогом можуть порівнюватися відстань між ПС, залишок часу до найнебезпечнішого зближення (CPA).

При використанні багатоальтернативного підходу або багатоступінчастої логіки аналізу небезпеки вводиться декілька класів ситуацій відповідно до ступеня небезпеки. У працях [8; 9] розглядаються такі класи ситуацій:

- нормальна ситуація;
- ускладнення умов польоту;
- складна ситуація;
- аварійна ситуація;
- катастрофічна ситуація.

Метрика ситуацій [9] дозволяє розширяти базис класів ситуацій і більш детально аналізувати ступінь небезпеки ситуації. Метрика залежить від відстані між ПС та визначається функцією:

$$\varphi = \begin{cases} \frac{t}{\lambda_t} & \text{їдє } 0 \leq t \leq \lambda_t \\ 1 + \frac{t - \lambda_t}{\Delta U - \lambda_t} & \text{їдє } \lambda_U < t \leq \Delta U \\ 2 + \frac{2(t - \Delta U)}{n_t - \Delta U} & \text{їдє } \Delta U < t \leq \infty \end{cases},$$

де  $t$  – координата  $x$ ,  $y$  або  $z$ ;  $\lambda_t$  – середній розмір ПС за координатою  $t$ ;  $\Delta U$  – мінімально припустима відстань між ПС за координатою  $t$ , встановлена нормами ICAO;  $n_t$  – достатньо велика відстань за координатою  $t$ .

Для бічного ешелонування в умовах RNAV мінімально припустима відстань  $\Delta U$  – це половина величини встановленого типу RNP, що забезпечує збереження норм загальної похибки системи (TSE) протягом 95% польотного часу.

При  $|t_1 - t_2| \geq n_t$  за координатою  $t$  існує нормальна ситуація.

Характеристики  $\Delta U$  і  $n_t$  описують розміри та відстані повітряних коридорів в умовах польоту за жорсткими маршрутами і норми безпечного ешелонування в умовах Free Flight.

Реалізація багатоступінчастої логіки наведена в праці [10], де пороги класифікації ситуацій зображені у вигляді вкладених зон еліптичної форми (рис. 2). Знаходженню літака-порушника в одній із зазначених зон відповідає апіорно отримана ймовірність порушення заданого мінімуму ешелонування.

Очевидні переваги має багатоступінчаста логіка, оскільки на відміну від логіки з одним порогом, у ній може бути реалізовано:

- кілька порогів раннього попередження (зони прийняття рішення бортовою частиною);
- поріг передачі відповідальності за розв'язання конфлікту наземному диспетчеру;
- пороги спрацьовування бортової системи TCAS (повідомлення типу Traffic Alert та Resolution Advisory);
- поріг реакції пілота за візуальними спостереженнями.

За способом розрахунку безпечного маневру методи розв'язання конфліктних ситуацій поділяються на автоматичні і автоматизовані.

До автоматичних методів, коли система виконує розрахунок одного або декількох маневрів і пропонує оператору затвердити один з маневрів, належать:

- оптимізаційні методи;
- методи потенціалів;
- генетичні алгоритми.

Метод жорстких схем маневрів застосовують при необхідності для використання набору заздалегідь визначених типів траєкторій (бортові системи GPWS).

При розрахунку маневру оптимізаційними методами (система ARC2000) використовується пошук оптимальних траєкторій відповідно до деякого оптимізаційного функціоналу. Оптимізація проводиться як у локальних масштабах, тобто для одного або двох ПС [11], так і у глобальних масштабах – для всієї сукупності ПС [12], що істотно збільшує обсяг обчислень і робить багато методів практично нереалізованими навіть при сучасному рівні комп'ютерної техніки.

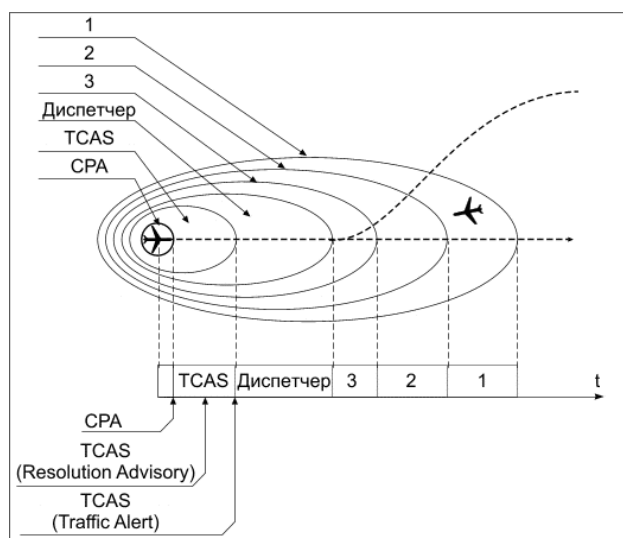


Рис. 2. Багатоступінчаста логіка аналізу небезпеки:

1, 2, 3 – ранні пороги оповіщення

При оптимізації безпечних маневрів використовують такі основні критерії:

- різні міри просторового відхилення від початкової траєкторії;
- мінімум безпечної відстані між конфліктуючими ПС;
- часове відхилення від запланованого прибуття в контрольну точку;
- тривалість маневру;
- ступінь відхилення керуючих швидкісних і кутових параметрів;
- витрати палива;
- пріоритети ПС;
- пріоритети типів маневрів;
- комфорт пасажирів;
- складність маневрів.

Система пріоритетів дозволяє прискорити процес пошуку оптимального маневру, оскільки містить попередньо оцінені значення оптимізаційного функціоналу для даного маневру.

Метод потенціалів запозичений з області робототехніки, де велике значення має задача безпечного розділення і координації мобільних роботів в обмеженому просторі [2; 3]. Метод полягає в розрахунку безпечних маневрів так, що кругові захисні зони навколо кожного ПС ніколи не повинні перетинатися, а можуть тільки дотикатися. При цьому вважається, що на об'єкт (ПС) діють умовні сили притягання та відштовхування. Сили притягання  $U_{пр}$  характеризують наміри об'єктів і діють в напрямку планового руху об'єкта, або наступної точки маршруту. Вони пропорційні квадрату відстані  $d$  до наступної точки маршруту:

$$U_{пр} = d^2 / 2.$$

Сили відштовхування  $U_{в}$  забезпечують запобігання зіткнень об'єктів. Вони максимальні при дотиканні захисних зон об'єктів з радіусом  $r$ , обернено пропорційні квадрату відстані до конфліктуючого ПС  $d_c$  і діють в межах кола заданого радіуса  $\delta$ :

$$U_{в} = \begin{cases} -\frac{(d_c - (r + \delta))^2}{2\delta} & \text{їдє } r \leq d_c \leq r + \delta; \\ 0 & \text{їдє } d_c > r + \delta. \end{cases}$$

Сума сил відштовхування і притягання всіх об'єктів, що діють на даний об'єкт у заданий момент часу, визначає положення ПС у цей момент часу (рис. 3). Для забезпечення узгодженості у діях об'єктів заздалегідь вводиться компонент вихрового поля, що автоматично забезпечує необхідний напрямок відхилення траєкторій при розрахунку маневрів (рис. 4).

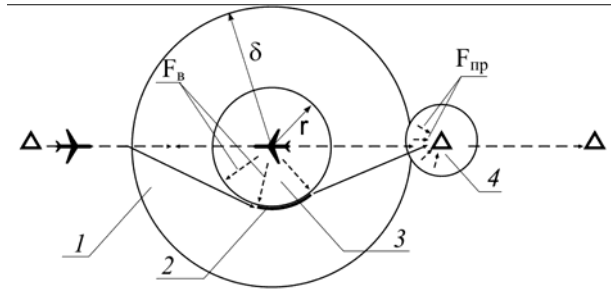


Рис. 3. Метод потенціалів:

1 – зона дії сил відштовхування другого ПС; 2 – результуюча траєкторія першого ПС; 3 – захисна зона другого ПС; 4 – точка маршруту першого ПС з силами притягання

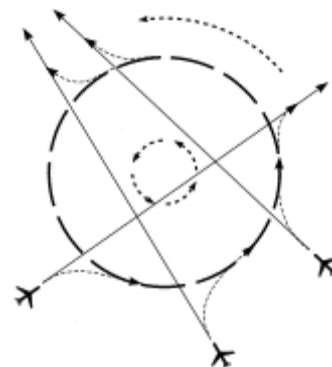


Рис. 4. Узгодженість дій ПС в методі потенціалів

Очевидний недолік методу – необхідність повного обрахунку положення всієї сукупності ПС для кожного моменту часу і складність реалізації літаком більшості отриманих за допомогою цього методу маневрів.

Генетичні алгоритми відносять до методів штучного інтелекту. Суть адаптованого для завдань АТМ генетичного алгоритму, такого, як GEARS [13], полягає у формуванні набору викривлених варіантів початкової траєкторії на ділянці маршруту, на якій є перетин з потенційно небезпечними зонами (порушення ешелонування з іншими ПС, вхід в зону небезпечних метеорологічних явищ).

Викривлення траєкторії виконується шляхом внесення шуму в положення контрольних точок маршруту як за повздовжньою, так і за поперечною координатою руху ПС (рис. 5).

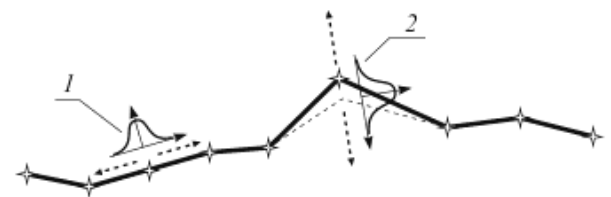


Рис. 5. Генетичний алгоритм:

1 – викривлення траєкторії за повздовжньою координатою; 2 – викривлення траєкторії за поперечною координатою

Крім того, виконується випадкове видалення або додавання додаткових контрольних точок. З отриманого набору траєкторій вибирається найбільш оптимальний маневр відповідно до критеріїв мінімальної довжини, який не перетинає жодної небезпечної зони.

Перевага методу полягає в швидкості знаходження вирішення порівняно з багатьма оптимізаційними методами.

При розв'язанні конфліктної ситуації автоматизованими методами система пропонує тільки інструменти, а побудову маневру виконує оператор. До автоматизованих можна віднести такі методи, що застосовуються в системах URET [5], CTAS [6], HIPS [14].

Оператор в таких системах аналізує можливий розвиток ситуації на екрані системи і власноруч змінює траєкторії ПС, уникаючи їх перетинів із попередньо розрахованими системою небезпечними зонами.

Якщо розрахунок маневру відсутній, система виконує тільки функцію оповіщення.

Автоматичні методи значною мірою відносяться до бортових систем, а автоматизовані – до наземних, хоча це не є правилом. Це пояснюється тим, що пілот більш обмежений в можливостях розрахунку безпечних маневрів ніж диспетчер, який спостерігає сукупну обстановку повітряного руху і може розраховувати безпечні маневри з позиції глобальної оптимізації.

За типом маневрів та керованими параметрами виділяють такі способи розв'язання конфліктних ситуацій:

- за висотою;
- за курсовим кутом;
- за швидкістю;
- комбінація перших трьох варіантів.

Стратегія розв'язання конфліктних ситуацій являє собою методи попарного розв'язання конфліктів (попарний перебір) і методи глобального розв'язання складних конфліктів.

Під час виявлення конфліктів декількох пар ПС, близько розташованих за відстанню і часом, процеси розв'язання цих конфліктів також можуть перекриватися за часом. Так, розв'язання одного конфлікту може істотно вплинути на інші конфліктні ситуації. Це може викликати певні незручності з точки зору НМІ та оптимальності всього процесу розв'язання. У зв'язку з цим, часто використовують об'єднання декількох простих конфліктів між парами ПС в один складний – кластер.

Використання глобальних методів і кластерів дозволяє зменшити обчислювальні витрати порівняно з методами попарного перебору.

За способом розподілу відповідальності за розв'язання конфлікту виділяють методи, що застосовують у таких системах:

- бортових (автономних) (TCAS/ACAS, ASAS, NLR PREDASAS);
- наземних (URET, CTAS, HIPS);
- розподілених наземно-бортових (ARC2000).

До методів розв'язання конфліктних ситуацій бортовими системами належать:

- некооперативні методи, коли для кожного ПС розраховується маневр без узгодження з іншими ПС [2; 3];
- кооперативні методи, коли ПС виконують обмін даними для узгодження маневрів [12].

Кооперативні методи часто ґрунтуються на методах штучного інтелекту, зокрема, мультиагентних системах і реалізують глобальну стратегію розв'язання конфліктів.

У бортових методах частіше реалізуються алгоритми візуальних правил польоту (VFR), а у наземних – правил польоту за приладами (IFR).

Найбільш ефективними з погляду надійності й безпеки розв'язання конфліктної ситуації є розподілені системи (DAG-TM), в яких частіше застосовуються розширені правила польоту (EFR).

За типами маршрутів повітряного руху виділяють методи, що застосовують для традиційних жорстких маршрутів і гнучких маршрутів Free Flight.

За типом часового діапазону визначення конфліктів (відносно залишку часу до небезпечного наближення) існують такі методи:

- тактичні методи, які використовують у системах запобігання зіткненням (ACAS) з часом прогнозування до 1–2 хв;
- стратегічні методи, які застосовують у системах підтримання безпечного ешелонування (ASAS) з часом прогнозування до 20 хв.

Методи вирішення конфліктів відносно типу перешкод бувають: динамічні (перешкода “літак”, перешкода “небезпечне метеорологічне явище”) і статичні (небезпечні або заборонені зони і наземні перешкоди).

## Висновки

Проведена класифікація методів розв'язання конфліктних ситуацій в умовах вільного польоту дозволяє зробити такі висновки.

1. Значна частина методів та алгоритмів розрахована на конфліктні ситуації за участю тільки двох ПС, а для більш складних випадків використовує попарний перебір. При цьому не враховується можливий вплив розв'язання одного конфлікту на інші конфлікти, що розташовані порівняно недалеко за часом та відстанню. Отже, пе-

реваги мають кооперативні методи зі стратегією глобального розв'язання складних конфліктів.

2. Застосування багатоступінчастої метрики ситуацій під час аналізу конфліктів дає можливість регламентувати розподіл відповідальності за забезпечення ешелонування між наземною частиною (диспетчером) та бортовою (пілотом), а також знизити рівень хибних тривог.

3. Найбільша ефективність розв'язання конфліктів досягається при використанні розподілених наземно-бортових систем.

### Список літератури

1. Kuchar J.K., Yang L.C. A review of conflict detection and resolution modeling methods // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2000. – Vol. 1. – 4. – P. 179–189.
2. Zeghal K. A review of different approaches based on force fields for airborne conflict resolution // Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. – 1998. – P. 818–827.
3. Eby M., Kelly W. Free flight separation assurance using distributed algorithms // Proc. 1999 IEEE Aerospace conf., Snowmass. – 1999. – P. 429–441.
4. Ratcliffe S. Collision avoidance and the Future Air Traffic Control // Journal of Navigation. – 1973. – Vol. 26. – 4. – P. 423–430.
5. Brudnicki D.J., McFarland A. L. User request evaluation tool (URET) conflict probe performance and benefits assessment". Report MP97W0000112. The MITRE Corporation. – 1997. – P. 2–18.
6. Isaacson D., Erzberger H. Design of a conflict detection algorithm for the center TRACON automation system // Proc. 16th Digital Avionics Systems Conf., Irvine. – 1997. – P. 9.3-1–9.3-9.
7. Paielli R.A., Erzberger H. Conflict probability estimation for free flight // NASA Journal of Guidance, Control and Dynamics. – 1997. – Vol. 20. – 3. – P. 588–596.
8. Харченко В.П., Косенко Г.Г. Многоальтернативный последовательный метод в задачах ситуационного анализа воздушной обстановки // Моделирование радиоэлектронных систем и комплексов обеспечения полетов: Сб. науч. тр. – К.: КМУГА, 1996. – С. 3–10.
9. Харченко В.П., Корчунов Д.О. Метричний простір ситуацій повітряного руху літальних апаратів // Вісн. НАУ. – 2002. – №3. – С. 63–68.
10. Kuchar J. K., Yang L. C. Prototype conflict alerting logic for free flight // Proc. 35th AIAA Airspace Science Meeting & Exhibit. – 1997. – Vol. 20. – 4. – P. 768–773.
11. Hu J., Prandini M., Sastry S. Optimal maneuver for multiple aircraft conflict resolution: A braid point of view // Proc. of the 39th IEEE conf. on decision and control. – Sydney. – 2000. – Vol. 4. – P. 4164–4169.
12. Tomlin C., Pappas G., Sastry S. Conflict resolution for air traffic management: A study in multi-agent hybrid systems // IEEE Transactions on automatic control. – 1998. – Vol. 43. – 4. – P. 509–521.
13. Irvine R. The GEARS conflict resolution algorithm // AIAA 98-4236 AIAA GN&C conf., Boston. – 1998. – P. 787–797.
14. Meckiff C., Gibbs P. PHARE Highly Interactive Problem Solver // Eurocontrol Experimental Centre. Report 273/94. – 1994. – P. 2–6.

Стаття надійшла до редакції 14.03.05.

С.А. Загора

Анализ методов решения конфликтных ситуаций в условиях свободного полета

Рассмотрены современные подходы к решению конфликтных ситуаций в воздушном пространстве свободного полета Free Flight Airspace. Приведена расширенная классификация методов решения конфликтов.

S.A. Zakora

Classification of conflict resolution modeling methods for free flight

State of art for conflict resolution in Free Flight Airspace is described. Detailed classification of resolution methods is given.